

## ERATO「彌田超集積材料」プロジェクト 追跡評価報告書

### 1. 研究成果の発展状況や活用状況

本プロジェクトは、ナノテンプレート(ナノスケールの鋳型)を利用して、各構成成分の精密な配置・配列を実現し各成分同士の相互作用を精密に制御することで、単なる成分の足し合わせ以上の性質をもつ材料(超集積材料)の創出を目標に、以下の4グループで開始した。

- ①新しい転写プロセスの開発を目指す転写材料G
- ②自然界のナノ・マイクロ構造の機能化プロセス開発を目指すバイオテンプレートG
- ③分子グリッド配線と単一分子伝導特性の評価法開発を目指す分子回路G
- ④異種物質のナノ規則配列により誘起された機能の開発、実装を目指すナノ接合G

そして本プロジェクトの後半において、それらを以下の3つの分野に再編した。

- ①分子回路工学：異種材料の集積化プロセス
- ②バイオテンプレート法：かたちの転写プロセス
- ③スマートメンブレン、新EUV発生ターゲットなどの展開研究

構成材料のサイズ、かたち、配置、配列を規定した均質な混合状態を実現する強力な材料化学プロセスを提示した結果、分子グリッド配線や電極との接合技術(遷移金属錯体を用いない共役系高分子の連鎖的重合反応の開発を含む)、らせん形状藻類のスピルリナを利用した金属マイクロコイルに代表されるバイオテンプレート技術など、既存の材料であってもプロセス技術を鍵とする混合パラメーターの精密制御によって、各成分の相互作用が強く顕在化した人工物質(超集積材料)が構築可能であることを示した。

本プロジェクト終了後、分子回路工学ではAuナノロッド配線技術の光特性の解明と応用、水溶性フッ素化ポリ(アリーレンエチニレン)や樹状構造ビオローゲン等の新しい相関物質や配列分子の発明と応用、バイオテンプレート法ではスピルリナ鋳型金属コイルの電磁波・光特性の解明と応用、その他では機能集積スマートメンブレンの提案、新しいEUVターゲット(線源)の提案などに関して研究展開を見せている。しかし一方で、発表された論文数は11報と少ない。この背景には、当時の研究プロジェクトのグループリーダーの異動先の職場の環境が、多くの場合で研究実務から離れていることが一つ挙げられる。加えて、プロジェクト終了年度までに研究成果をまとめて論文として公表出来なかった幾つかの課題を、終了後数年経って漸くまとめて論文として公表したケースも少なからず存在したことも一因である。同じような理由と推察できるが、特許活動もプロジェクト期間中には20件以上国内出願し、半分以上が国内登録されていたが、プロジェクト終了後には知財活動の成果が認められず残念な状況と言える。

研究助成に関しては、研究総括であった彌田が、本プロジェクトの途中から「金属ナノ構造表面および配列体に近接した分子・高分子の電子構造・振動ダイナミクス」という研究課題でJSPS・国際化学研究協力事業(ICCプログラム)に参画し、プロジェクト終了後も継続し

たほか、文部科学省科学研究費助成事業「新学術領域研究」配位アシンメトリーの課題として「3次元金属ナノ構造量産プロセスとキラル機能探索」に参画し、鎌田（元 ERATO 彌田超集積材料プロジェクトのグループリーダー）を分担研究者の一人として招聘し研究展開を図っている。さらに NEDO 先導研究プログラムの「省エネルギー社会を支える革新的機能性材料技術の開発」にて課題「藻類由来金属微小コイル分散によるギガ・テラヘルツ帯電波吸収の研究開発」を獲得し、バイオテンプレートによる金属マイクロコイルの研究を継続的に牽引した。この継続的な研究に関連して、彌田は 2020 年に民間企業と共同で「電子機器トータルソリューション展」において、第 16 回 JPCA 賞「微細藻類由来マイクロコイルを利用したギガヘルツ・テラヘルツ帯電波吸収体」を受賞した。

テンプレート法という手法は本質的にはプロセス開発に近いので、対象物質や用途を限定する必要の無い研究分野とも言える。そのような背景のため本研究プロジェクトでは、拡散し易い課題テーマが多かったと思われるが、他の研究者や企業との共同研究により、バイオテンプレート法による金属マイクロコイルの発明と量産化への見通しと、テラヘルツ電磁波との相互作用による 6G 世代の次世代アンテナへの応用の可能性が明らかとなり、実用化へ向けた検討が着実に進んでいることから、今後の発展が期待される。

## 2. 研究成果から生み出された科学的・技術的および社会的・経済的な波及効果

### (1) 研究成果の科学的・技術的観点からの貢献

本プロジェクト終了後二年を経て、スピルリナテンプレート金属  $\mu$  コイル (STM  $\mu$  C) を組み込んだパラフィンシートを用いて包括的なミューラー行列を測定した結果、STM  $\mu$  C はテラヘルツ (THz) 光の様々な偏光現象に対応した調整・利用が出来る可能性を有しているという重要な論文が公開されたが、この研究成果自体は、本プロジェクト期間中に得られていた研究成果である。さらに理化学研究所および京都大学との共同研究で、テラヘルツ近接場顕微鏡を用いて、無電解メッキで作製した金属マイクロらせん構造とテラヘルツ光との相互作用を調べた結果、テラヘルツ光によって励振された微小金属らせん構造から、特定の方向へ異なる周波数のテラヘルツ光が再放射される様子を、回折限界を超えたテラヘルツ光波長の 10 分の 1 程度の空間分解能とフェムト秒の時間分解能でリアルタイムに可視化することに成功した。これはテラヘルツ近接場顕微鏡が、アンテナをはじめとする種々のテラヘルツ関連デバイスを開発する上で、極めて有益なデータを得ることができるツールであることを証明した研究成果であると同時に、このらせん構造から放射される電磁波の帯域が 1 テラヘルツ以上あり、現在の最先端 5G 通信規格で使われている帯域の約 1 万倍ということで、次世代の大容量超高速移動通信などにおける超広帯域アンテナとしての応用が期待できる研究成果である。加えて、1 個のアンテナだけで異なる周波数および異なる方向のテラヘルツ光を送受信できることを意味しており、非常に高性能な微小アンテナとしての動作も期待できる。すでに均一な藻類スピルリナを培養する技術を取得していることから、低コスト

で大量に微小金属らせん構造素子を作製することが可能な状況なので、今後その発展が大いに期待される。

分子配線技術においても、重合配線可能な $\pi$ 共役系高分子の重合として、 $\pi$ 共役した骨格の電子欠乏したテトラフルオロアレン単位および水可溶化オリゴエーテル(OE)側鎖よりなる新しいタイプのポリ(アリーレンエチニレン)(PAE)の合成に成功したことがプロジェクト終了後数年を経て報告されているが、これも実質的には本プロジェクト期間中に得られた研究成果をまとめたものと言える。このフッ素化したPAEは、水に対し分光的に十分な溶解性を示し、高い蛍光量子収率、およびアリルアミンによる還元蛍光抑制を示すなどの機能を備えていることから、分子グリッド配線を目標とする要素技術の一つであるほか、 $\pi$ 共役単分子配線デバイスの構成要素だけではなく、金属有機構造体(MOF)、共有結合性有機構造体(COF)、高分子ブラシ等の構成要素になり得ることを示した。一方で、Au ナノワイヤアレイ配線に接触した単鎖およびポリチオフェン(P3HT)の励起状態や蛍光増強の解析など、多くの電極と導電性分子との接合状態をマイクロ電極の金属プラズモンによる光学的挙動で間接的に把握しようとする研究も複数実施されており、一貫した研究路線の進捗が認められる。一方で、ナノ～マイクロ電極と導電性高分子の接合を直接把握する技術や2接点間での配線を実空間で捉える実験手法の開拓も期待したい。

以上のように、科学技術的には、テンプレートという発想とその応用の拡大を見据えて、分子回路を形成する単位技術の開発や自然界の複雑な形態のテンプレート法としてのバイオテンプレート法では藻類からのコイル、珪藻を用いた金属ナノホールアレイ、タンパク質からの凝縮体などの創製とその特性の把握と応用へと技術を展開しつつある。

## (2) 研究成果の社会的・経済的観点からの貢献

バイオテンプレート法によるスピルリナ鋳型金属 $\mu$ コイルは、新しいテラヘルツキラル応答を示し、そのキラル特性の制御法を明らかにするとともに、その樹脂コンパウンドがテラヘルツ光との相互作用を示し、次世代超高速移動通信における高性能アンテナへの応用の可能性が示されており、今後の無線アクセス技術における5Gから6Gへの進展に沿った形で、次世代アンテナ技術の有力候補になる可能性がある。

分子回路の発想は、電子回路の微細化には限界があるというムーアの法則の限界に対し、分子・原子レベルの機能をナノレベルで配線し回路を構成するというビルドアップ・ナノテクノロジーである。本プロジェクトからの継続的研究で実証された金ナノロッドや $\pi$ 共役系高分子ワイヤ、樹状ビオローゲン配線、励起状態解析やテラヘルツ発光の解明、そして樹状ビオローゲンの整流効果の制御法などは、次のステップへ繋がる技術と考えられ、幾つかの要素技術が複合されていけば、ムーアの法則を凌駕し得る新しいリソグラフィの可能性が生まれるかもしれない。

プロジェクト実施期間の途中から検討された液晶性ブロックコポリマーの三次元異方的相分離膜にするスマートメンブレン技術はナノレベルの細孔チャネルを設計可能で、大面

積化が簡便に出来るという利点もあり、機能性電池用セパレータ、逆浸透膜などへの応用が考えられる。自己テンプレート法マイクロ相分離 (STAMPS) 法は、3D メソ構造を容易に提供出来ることから、各種選択的分離法、中でも水分離への応用が期待される。

また分子回路工学の研究を通じて、新しい合成技術が生まれた。遷移金属触媒を用いない  $\pi$  共役系高分子のリビング重合が開発され、分子量を制御しながらの架橋を可能にした。その後水溶性などの特徴を有する新しいタイプの PAE を合成することに成功したが、このフッ素化 PAE は弱い相互作用の相関物質として使用でき、金属有機構造体 (MOF)、共有結合性有機構造体 (COF)、高分子ブラシ、単一分子回路などの  $\pi$  共役分子装置の構成要素になり得る。

彌田が中心となって産業界・アカデミアを巻き込んだバイオテンプレート研究会の立ち上げや、小・中・高等学校の科学教室など様々なアウトリーチ活動が実施された。また既に産業界との連携も進んでいて、企業からのアプローチも受けているが、より積極的な交流を進め産業界とのニーズのマッチングに努めることで、社会・経済への貢献は大きくなると期待できる。これらの研究成果を現在の社会を牽引する電子・半導体産業、化学・高分子合成産業分野等に適用し、これまで解けなかった課題の解決法に繋がることが期待される。

以上により、本プロジェクトは研究成果の発展や活用が認められ、科学的・技術的あるいは社会的・経済的な波及効果が生み出されている。

以上